

СРАВНЕНИЕ ЗОНАЛЬНОГО МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ С МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ОБЪЕМОВ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА НАГРЕВА НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ В КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ

Аннотация

В работе представлено сравнение двух методов математического моделирования теплообмена излучением: метод конечных объемов и зональный метод. Была построена модель кольцевой нагревательной печи с вращающимся подом для нагрева непрерывнолитой заготовки, и проведено моделирование ее тепловых режимов разными методами. В результате моделирования показано, что методы FVM и зональный показали сопоставимую точность моделирования (расхождение не превышает 50°C). Время моделирования методом FVM превышает время выполнения зонального метода в 5–10 раз ввиду долгого расчета интенсивности излучения (50–100 итераций) на одну итерацию гидродинамики и горения.

Ключевые слова: нагревательные печи, теплообмен излучением, зональный метод, метод конечных объемов.

Abstract

The comparison of two modelling methods for radiation heat exchange – finite volume and zonal methods – has been provided. The mathematical model of heating concast bars ring furnace has been created. Modelling of different heat modes of this furnace has been completed. In the result of modelling it is shown, that these methods demonstrate similar accuracy of obtained temperature values (not exceeding 50°C). The calculation time of FVM method is greater than zonal method by 5–10 times, because slow convergence (50–100 iteration) on a one calculation of hydrodynamic and combustion parameters.

Key words: heat furnaces, radiation exchange, zonal method, finite volume method.

Введение

В настоящее время широкое развитие получило использование методов математического моделирования применительно к энергоемким металлургическим процессам, в частности – к нагревательным печам. К настоящему времени сложилось несколько подходов к моделированию теплового излучения в термических печах. Коммерческие программы, сочетающие в себе расчет теплообмена излучением с расчетом гидродинамики, горения и других физических процессов, как правило, используют конечноэлементные методы: метод дискретных ординат (DOM), метод конечных объемов (FVM) и т.п. Особенность этих методов заключается в однократном полном расчете всех потоков тепла в системе, исходя из жестко заданных граничных условий. При изменении хотя бы одного граничного условия расчет необходимо полностью проделывать заново, что, вместе с необходимостью разбивать рабочий объем сеткой достаточно мелкого масштаба, делает данные методы требовательными к времени расчета и компьютерным мощностям. Другой подход состоит в разбиении всех поверхностей и рабочего объема системы на относительно небольшое число зон с дальнейшим получением для данного разбиения некоторой промежуточной характеристики, инвариантной к части граничных условий. Такой характеристикой, как правило, является матрица размерности $N \times N$ (где N – число выделенных зон), называемая матрицей обобщенных угловых коэффициентов излучения (в англоязычной литературе для аналогичных целей введена матрица прямых взаимных поверхностей (Direct Exchange Area Matrix – DEA). Данная матрица, будучи вычисленной однократно, существенно

упрощает дальнейшее вычисление тепловых потоков в системе для различных наборов граничных условий. Это позволяет вычислить матрицу обобщенных угловых коэффициентов один раз, и в дальнейшем проводить быстрые расчеты с различными наборами граничных условий. Например, нахождение неизвестных температур зон в системе уравнений теплового баланса. Таким образом, преимуществами методов конечных элементов являются простота программирования, использование той же сетки элементов, что и для методов расчета гидродинамики и горения. Однако, данные методы не оптимизированы для многократных вычислений с различными граничными условиями. Преимуществами зонального метода являются его вычислительная точность, а также сокращение вычисления для расчета при изменении граничных условий (граничных потоков или температур). К недостаткам данного метода можно отнести то, что он требует построения отдельной упрощенной сетки зон, а также повышенную вычислительную сложность определения обобщенных угловых коэффициентов, зависящих как от геометрических соотношений, так и от физических параметров (концентраций веществ и температуры печной атмосферы).

В работе рассмотрено сравнение двух методов моделирования теплообмена: метода конечных объемов (FVM) и усовершенствованного зонального метода (DTZM). В качестве объекта моделирования была выбрана печь нагрева непрерывнолитых заготовок с вращающимся подом. Актуальность

Теоретическое описание используемых методов

Метод конечных объемов

Данный метод описан достаточно подробно в ряде зарубежных [1–3] а также отечественных источников. В его основе лежит решение уравнения теплового баланса для ячейки пространства (конечного объема) P для каждого из пространственных направлений. В качестве известных величин берутся ранее рассчитанные интенсивности излучения на границах данного объема I_x , I_y , I_z , а также излучение источников, расположенных внутри данного объема b_P . В качестве неизвестной величины выступает интенсивность излучения внутри объема P I_P . Общий вид уравнения для конечного объема:

$$a_P I_P = a_x I_x + a_y I_y + a_z I_z + b_P, \quad (1)$$

где a_P , a_x , a_y , a_z – коэффициенты определяемые геометрической конфигурацией конечного объема и выбранным направлением излучения.

Основная вычислительная трудность метода состоит в расчете интенсивности I . При этом в случае большого числа ячеек (до 100000) требуется от 50 до 100 итераций до достижения условия сходимости решения.

Коэффициенты для ортогонального объема размером $(\Delta x) \times (\Delta y) \times (\Delta z)$ и выбранного направления l в общем случае вычисляются по формулам:

$$a_P = \Delta y \Delta z |D_x^l| + \Delta x \Delta z |D_y^l| + \Delta x \Delta y |D_z^l| + \Delta x \Delta y \Delta z \Omega^l \quad (2)$$

$$a_x = \Delta y \Delta z |D_x^l|, a_y = \Delta x \Delta z |D_y^l|, a_z = \Delta x \Delta y |D_z^l| \quad (3)$$

где значения D_x^l , D_y^l , D_z^l определяются выбранным направлением l и телесным углом распространения излучения Ω^l .

В общем случае, когда температуры (а значит и интенсивности) неизвестны, для получения температурного поля требуется итерационный процесс перевычисления интенсивностей по формулам (1)–(3).

Усовершенствованный зональный метод

Зональный метод традиционно используется для расчета тепловых режимов в металлургических печах. Свое развитие он получил в работах группы под руководством Лисиенко В.Г. [4–6].

В зональном методе можно выделить несколько характерных этапов:

1. Выделение в системе поверхностных и объемных зон, характеризующихся в первом приближении постоянными физическими параметрами внутри зоны (температура, коэффициенты поглощения и отражения и т.п.)

2. Присвоение каждой из зон системы присущих ей оптических свойств (степень черноты для поверхностных зон, коэффициент поглощения для объемных зон) на основании принятых моделей излучения поверхностей твердых тел и газов.

3. Вычисление матрицы обобщенных угловых коэффициентов на основании геометрического взаиморасположения зон и их оптических свойств с помощью численного определения по формуле:

$$\psi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} e^{-\tau(dA_j, dA_i)} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi L^2} dA_j dA_i, \quad (4)$$

где

dA_i и dA_j – элементарные площадки, выделенные на поверхности зон i и j ;

A_j и A_i – площади поверхности зон i и j ;

θ_i и θ_j – углы между нормальными к поверхности зон и лучем, связывающим их между собой.

$\tau(dA_j, dA_i)$ – оптическая толщина слоя среды на пути луча между площадками dA_i и dA_j

4. В случае присутствия в системе отражающих поверхностей вычисление матрицы обобщенных разрешающих угловых коэффициентов, учитывающих переотражения излучения в системе.

5. Вычисление потоков на каждую из поверхностных и объемных зон на основании полученных величин.

Для получения достоверной картины распределения тепловых потоков, поступающих к заготовкам в каждый момент времени в печи, необходимо максимально точное определение принятых в модели параметров, влияющих на теплоперенос. Так как основным источником тепла в печи является сжигаемое в горелках топливо, то особое внимание необходимо уделить составу газовой смеси, образуемой в процессе горения. Для природного газа продукты сгорания представляют собой смесь диоксида углерода и водяных паров ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$). Эти газы являются основными излучающими компонентами атмосферы печного пространства, а их высокая температура и значительный объем делает их одним из основных источников излучения в печи в целом. Ключевой характеристикой, определяющей степень излучения печной атмосферы, является коэффициент поглощения k , который может быть получен из выражения:

$$k(T, p_{\text{CO}_2}, p_{\text{H}_2\text{O}}) = \frac{1}{L} \ln \left(1 - \varepsilon(T, p_{\text{CO}_2}, p_{\text{H}_2\text{O}}) \right), \quad (5)$$

где ε – интегральная степень черноты рассматриваемого объема газовой смеси; L – длина характеристического пути луча в данном объеме.

Учитывая сильную зависимость параметра ε от состава газовой смеси, геометрической конфигурации занимаемого газом объема и температуры газа, его определение сопряжено со значительными вычислительными трудностями, вызванными существенным изменением температур и состава газа как в различных точках печного пространства так и в различные моменты времени в процессе сгорания топлива. В данной работе для вычисления зональным методом определение коэффициента поглощения было проведено с помощью метода, представленного в [5], что позволило достичь точности результатов, сравнимой с точностью при вычислении FVM методом.

Условия и объект моделирования

В качестве объекта моделирования была выбрана кольцевая печь (КП) трубопрокатного цеха №1 ОАО «Северский Трубный Завод» (г. Полевской) ТПЦ–1 Основные конструктивные и режимные параметры КП приведены в табл. 1.

Необходимость моделирования режимов работы данной печи была вызвана установкой в процессе капитального ремонта печи инновационной конструкции пода печи: а именно в соответствии с патентом на полезную модель RU 128301 U1 «Устройство подины кольцевой нагревательной печи» (приоритет от 12.11.2012) [7] предложено усовершенствование подины печи, состоящее в установке на нее продольных выступов шириной 290 мм и высотой 60 мм, отстоящих друг от друга на расстоянии 350 мм, выполненных из огнеупорного бетона. Первым

этапом модернизации является анализ работы печи до реконструкции. Схема продольного разреза печи представлена на рис. 1.

Таблица 1

Основные конструктивные и режимные параметры кольцевой печи

Наименование параметра	Величина, ед. изм.
Длина печи по средней линии	70,7 м
Ширина рабочего пространства	5,2 м
Высота рабочего пространства	2,04 м
Диаметр заготовки	290–360 мм
Длина заготовки	2300–4500 мм
Вес	933–3596 кг
Количество заготовок в печи	120 заготовок
Расположение заготовок	Однорядное
Производительность печи	До 90 т/ч
Температура нагрева	1200–1300
Число зон регулирования	5 + 1 не отапливаемая
Количество горелок	56
Температура подогрева воздуха	400–500
Максимальный расход газа	5400 м ³ /ч

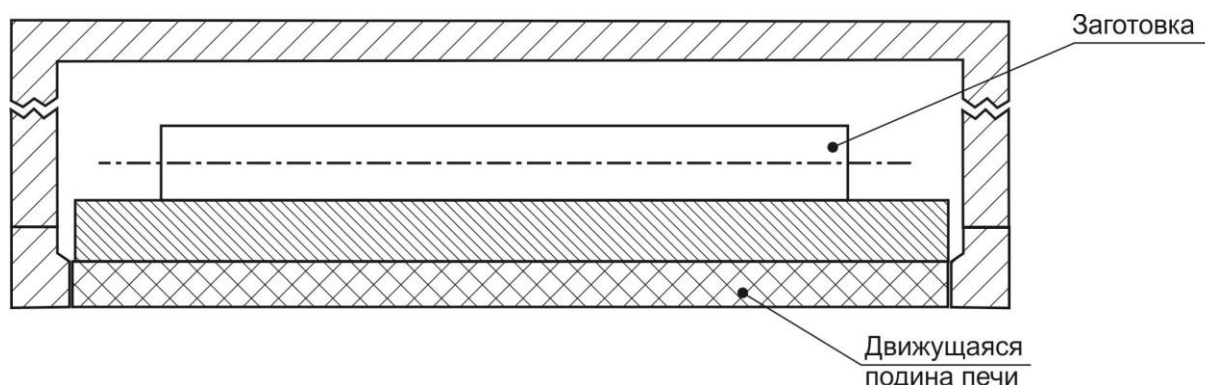


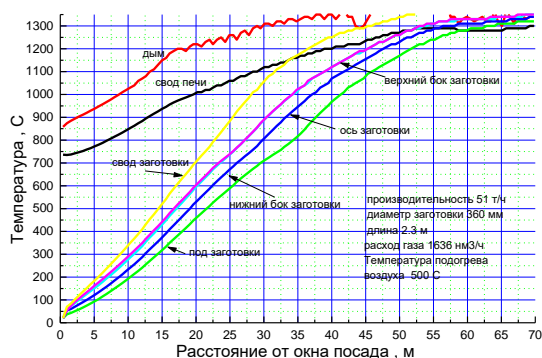
Рис. 1. Поперечный разрез печного пространства

В качестве базовых режимов для моделирования нагрева с различной конструкцией подины были взяты два характерных режима с производительностями печи 60 и 29 т/ч (типовые по результатам эксплуатации печи в линии проката) Критерием получения удовлетворительных результатов нагрева является достижение к концу нагрева температуры всех участков заготовки не ниже $1280^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$

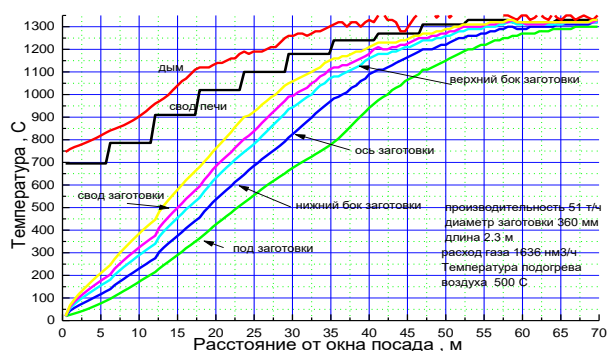
Результаты сравнения

Модель печи по длине была разбита на 12 расчетных участков. Каждый участок включает в себя 10 поверхностных и 2 объемные зоны. Каждая заготовка имеет 5 поверхностных зон, из которых 4 зоны соответствуют поду, верхней боковой части, нижней боковой части, своду заготовки соответственно, а одна зона моделирует одну или две торцевых поверхности заготовки. Отдельные зоны моделируют торцевые поверхности печи.

Результат моделирования каждой из температур поверхности зон представлен на рис.2а и 3а для FVM-метода и на рис. 2б и 3б для зонального метода:

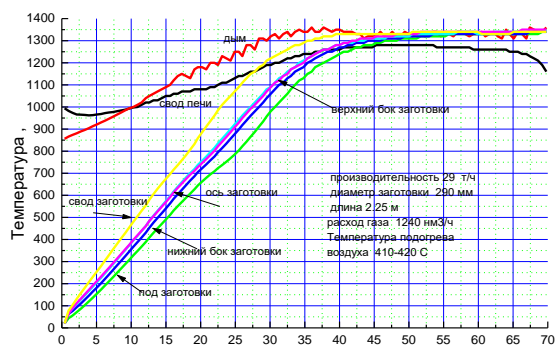


а)

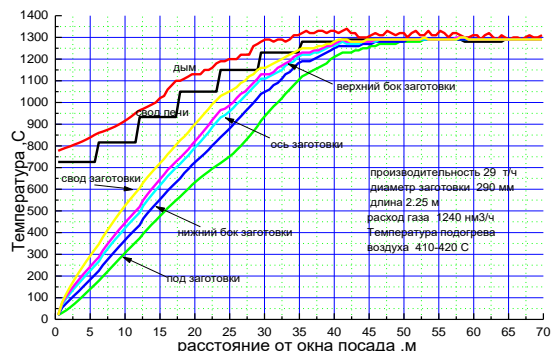


б)

Рис. 2. Динамика нагрева различных участков заготовки при производительности печи 60 т/ч, рассчитанная с помощью метода конечных объемов (FVM) (а) и с помощью зонального метода (б)



а)



б)

Рис. 3. Динамика нагрева различных участков заготовки при производительности печи 29 т/ч, рассчитанная с помощью метода конечных объемов (FVM) (а) и с помощью зонального метода (б)

Из сравнения результатов работы двух методов видно, что точность вычислений для обоих методов сравнима и составляет не более 50°C (с достижением максимального расхождения для температуры печного дыма).

Так как состав печной атмосферы значительно изменяется в зависимости от зоны печи, требуется динамическое перевычисление коэффициента поглощения излучения. При этом можно отметить, что при динамическом вычислении коэффициента поглощения для ячеек методом EWBM общее время выполнения FVM метода превышает время моделирования зональным методом в 5–10 раз. Если же динамическое вычисление коэффициента поглощения не используется, результаты моделирования методом FVM не соответствуют физическому процессу нагрева и не позволяют получить адекватные данные при моделировании.

Выводы

В работе были проанализированы два метода математического моделирования теплообмена излучением: метод конечных объемов и зональный метод. Была построена геометрия выбранного объекта моделирования – кольцевой нагревательной печи с вращающимся подом для нагрева непрерывнолитой заготовки.

В результате моделирования методы FVM и зональный показали сопоставимую точность моделирования (расхождение не превышает 50°C). Время моделирования методом FVM превышает время выполнения зонального метода в 5–10 раз ввиду долгого расчета интенсивности излучения (50–100 итераций) на одну итерацию гидродинамики и горения.

Список использованных источников

1. Kim S.H. Assessment of the finite-volume method and the discrete ordinates method for radiative heat transfer in a three-dimensional rectangular enclosure / S.H. Kim, K.Y. Huh. Numerical Heat Transfer. Part B. – 1999. – vol.35. – p.85–112.
2. Baek S.W., Kim M.Y. Nonorthogonal Finite-Volume Solutions of Radiative Heat Transfer // Numerical Heat Transfer Vol. 34, No. 4. December. 1998.
3. Mishra S.C et all. Dvelopment and Comparison of the DTM, DOM and FVM formulations // International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006).
4. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств (интегрированный энерготехнологический анализ: теория и практика). Т.1. – М: Теплотехник, 2008. – 608 с.
5. Лисиенко В.Г., Маликов Г.К., Титаев А.А. Простая аппроксимация степени черноты смеси $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$, используемая в зональном методе расчета теплообмена излучением // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21. №6. – С. 811–814.
6. Лисиенко В.Г., Маликов Г.К., Титаев А.А. Метод расчета взаимных поверхностей излучения в математических моделях высокотемпературных агрегатов, основанный на дискретизации по направлениям // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57. №8. – С. 47–50.
7. Топоров В.А., Губин Ю.Г., Щипанов М.А., Лисиенко В.Г., Засухин А.Л. Патент на полезную модель RU 128301 U1 “Устройство подины кольцевой нагревательной печи” (приоритет от 12.11.2012).

УДК669.188

Д. А. Лубяной, Б. Н. Карашкевич, Р. О. Мамедов, С. Г. Щербин, Д. Д. Лубяной, Е. Н. Гилева, А. С. Ефимова

ООО «ГИДРОМАШ – НК», г. Новокузнецк, Россия

РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В МАЛЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

Аннотация

Ресурсо и энергосбережение в настоящее время является наиболее важным направлением развития сталелитейного производства. Снижение расхода ферросплавов, в процессе выплавки стали в настоящее время является актуальной задачей. Один из основных дефектов литья стали как ситовидная пористость не появляется в хорошо раскисленной стали даже при высоком содержании водорода. Основным способом устранения этого дефекта является эффективное раскисление. В виду этого, одна из основных задач окислительного периода, по удалению водорода, становится менее актуальной. В этой связи становится малоцелесообразно в плавках для отливок выжигание большого содержания углерода из расплава, которая сопровождается окислением полезных примесей – кремния, марганца и хрома.

Ключевые слова: окисление стали, малые ДСП, ситовидная пористость, качество, термовременная обработка.

Abstract

The reduction in the consumption of ferroalloys in the steelmaking process is currently an urgent task. One of the main defects in steel casting like the sieve-like porosity does not show up in a well-deoxidized steel even with a high hydrogen content. The main way to eliminate this defect is effective deoxidation. In view of this, one of the main tasks of the oxidative period, to remove